

Kattegats vandkvalitet

Niels Kristian Højerslev, *Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik*

Indledning

Iltsvind i Kattegats bundvand var igangsætter for Vandmiljøplanen i 1987. Forringelsen af vandkvaliteten i Kattegat som følge af specielt kvælstofemissioner fra land, atmosfære og fra de tilgrænsende havområder er hovedansvarlig for den nuværende miljøtilstand. I dag er der konsensus om, at de samlede kvælstofemissioner fra atmosfæren til dansk territorialfarvand omfattende 100.000 km² udgør halvdelen af det totale danske bidrag. Landbidragene kan angives med tilfredsstillende nøjagtighed. Derimod er kvælstofemissionerne fra henholdsvis Nordsøen, Tyske bugt og Østersøen indtil indre danske farvande beskrevet mindre tilfredsstillende. Tyske Bugt er specielt af interesse, fordi den undertiden angives som hovedleverandør af kvælstof til Kattegat.

Meget forskelligartede oceanografiske målinger gennem 25 års ekspeditioner til søs kombineret med satellitobservationer og lange hydrografiske tidsserier begyndende omkring år 1900 viser, at Tyske Bugt kun bidrager lidt til Kattegats kvælstofbelastning taget som eksempelvis månedsmidler. Det kan desuden demonstreres, at den ringe belastning i al væsentlighed ikke finder sted i Kattegats bundvand men i det intermediære vand beliggende 10 til 20 m under havoverfladen. På baggrund af disse målinger kan der opstilles en simpel vandblandingsmodel for Kattegat, som har flere praktiske og direkte brugbare anvendelsesmuligheder, der er taget op fra polsk, tysk, svensk, dansk og norsk side.

Vandmasseklassifikation

Sædvanlig vandmasseklassifikation bygger på begreberne "konservative parametre", "vandtyper" og "vandmasser". En konservativ parameter beskriver en stofmængde, som hverken forbruges eller produceres lokalt. En vandtype defineres/fastlægges ved h.h.v. en udvalgt saltholdigheds (salinitets)- og temperaturværdi i det klassiske tilfælde. En vandmasse er derimod et blandingsprodukt af flere vandtyper og kan således ikke tilskrives enkeltværdier for salinitet og temperatur, men i stedet intervalværdier. I den sædvanlige salinitets-temperatur-analyse kan man beregne en vandmasses blandingsforhold for op til 3 forskellige vandtyper i oceanerne. Imidlertid giver brugen af temperatur som konservativ parameter betydelige begrænsninger i overfladevandet, fordi temperaturen ikke er konservativ der, men har et kildefelt på grund af eksempelvis solopvarmning.^{1,2}

For at kunne lave en vandmasseklassifikation i kystnære områder er det derfor nødvendigt at indføre en ny

konservativ parameter til erstatning for temperaturen, som i dette tilfælde er gulstof. Gulstof er en fællesbetegnelse for forskellige opløste organiske stoffer af typen humussyre og lignende, der findes i flod- og havvand.³ Det har en halveringstid på ca. 100 år, og udfældes ikke i vand med salinitet over ca. 6 promille og kan derfor betragtes som en konservativ parameter. Når gulstof bestråles, absorberer det i betydelig grad lys i den ultraviolette del af spektret, og mængden af gulstof i en vandmasse kan således bestemmes ud fra optiske metoder.

Store mængder af gulstof tilføres havet fra land via floder. Generelt er indholdet af gulstof i naturligt forekommende vandmasser derfor negativt og lineært korreleret med saliniteten, men hældningskoefficienten varierer fra havområde til havområde. I de øvre vandlag i Østersøen er gulstofindholdet højt, mens det i de ikke-kystnære vandmasser i Nordsøen er lille. Den jyske Kyststrøm er til gengæld speciel i denne sammenhæng ved at have en salinitet på 32-34 promille i Skagerrak området og samtidigt hermed at have et højt gulstofindhold. Årsagen hertil er det ekstremt høje indhold af gulstof i flodvandet, der strømmer til Tyske Bugt. Dette forhold kan udnyttes til identifikation af jysk kyststrømsvand.

Udstyr og metode

Gulstof lader sig bestemme ved lysabsorption som absorbans, A_{10} , i en 10 cm celle. I marin optik er det sædvanen at angive gulstofmængden som en absorptionskoefficient ved 375 nm, $a_y(375)[m^{-1}]$, hvor absorptionen er direkte proportional med gulstofkoncentrationen. Nærmere detaljer for disse omregninger, samt begrundelsen for disse, kan findes i referencerne 3-7. Her skal blot gives et par enkle beregninger til belysning af hovedtankegangen:

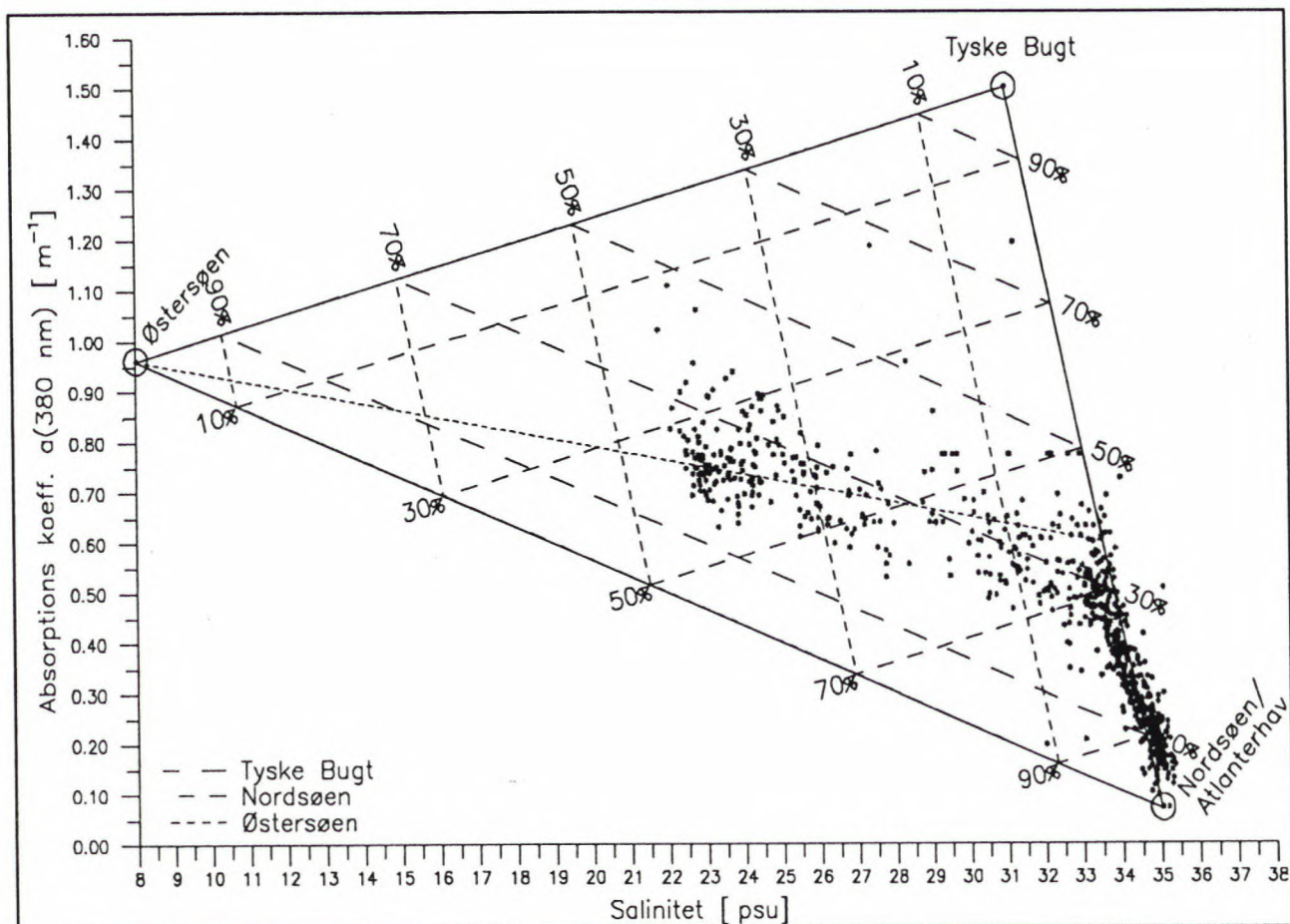
$$A_{10} = -\log_{10} T_{10} \quad (1)$$

T er transmittans og index 10 (ved A og T) refererer til længden i cm på den førnævnte celle.

$$T_{10} = e^{a_y(375) \cdot 0,1} \quad (2)$$

hvor $a_y(375)$ er en absorptionskoefficient ved 375 nm med enheden m^{-1} . Indsættes formel (2) i (1) fås:

$$a_y(375)[m^{-1}] = 23,3 \cdot A_{10}. \quad (3)$$



Figur 1. Salinitet-gulstofdiagram for oktober 1992, Kattegat - Skagerak.

Salinitet-gulstofdiagrammer

Figur 1 viser salinitet-gulstofdata fra oktober 1992 og det demonstrerer, at kattegatvandet i salinitetsområdet 20-33 promille hovedsaglig udgøres af nordsø-atlanterhavsvand og østersøvand. Det ses, at både kattegatvandets og skagerakvandets salinitet er negativt korreleret med dets indhold af gulstof.⁵

Figur 2 er data fra marts 1992. Bemærk den større punktspredning, men at hovedparten af punkterne er beliggende under den stiplede linie angivet i Figur 1. Dette betyder, at vand fra Tyske Bugt lejlighedsvis og lokalt udgør en større andel af kattegats vand.

Beregning af vandtypernes andele

Antag at man på en given position og dybde i f.eks. Kattegat har målt en salinitet på S_x promille og en gulstofmængde (absorptionskoefficient) på $a_{y,x}$ [m^{-1}]. Dette vand antages at være et blandingsprodukt af østersøvand, tyske bugtvand og nordsø/atlanterhavsvand i blandingsforholdet $q_0:q_T:q_N$. Hvis disse 3 kernevandmassers salinitet og

gulstofindhold benævnes h.h.v. S_0 , S_N , S_T , $a_{y,0}$, $a_{y,N}$ og $a_{y,T}$, kan der opskrives 3 ligninger til bestemmelse af h.h.v. q_0 , q_N og q_T . Disse har følgende udseende (se f.eks. Ref. 1 eller 2):

$$\begin{aligned} q_0 + q_N + q_T &= 1, \\ S_0 q_0 + S_N q_N + S_T q_T &= S_x, \\ a_{y,0} q_0 + a_{y,N} q_N + a_{y,T} q_T &= a_{y,x}. \end{aligned} \quad (4)$$

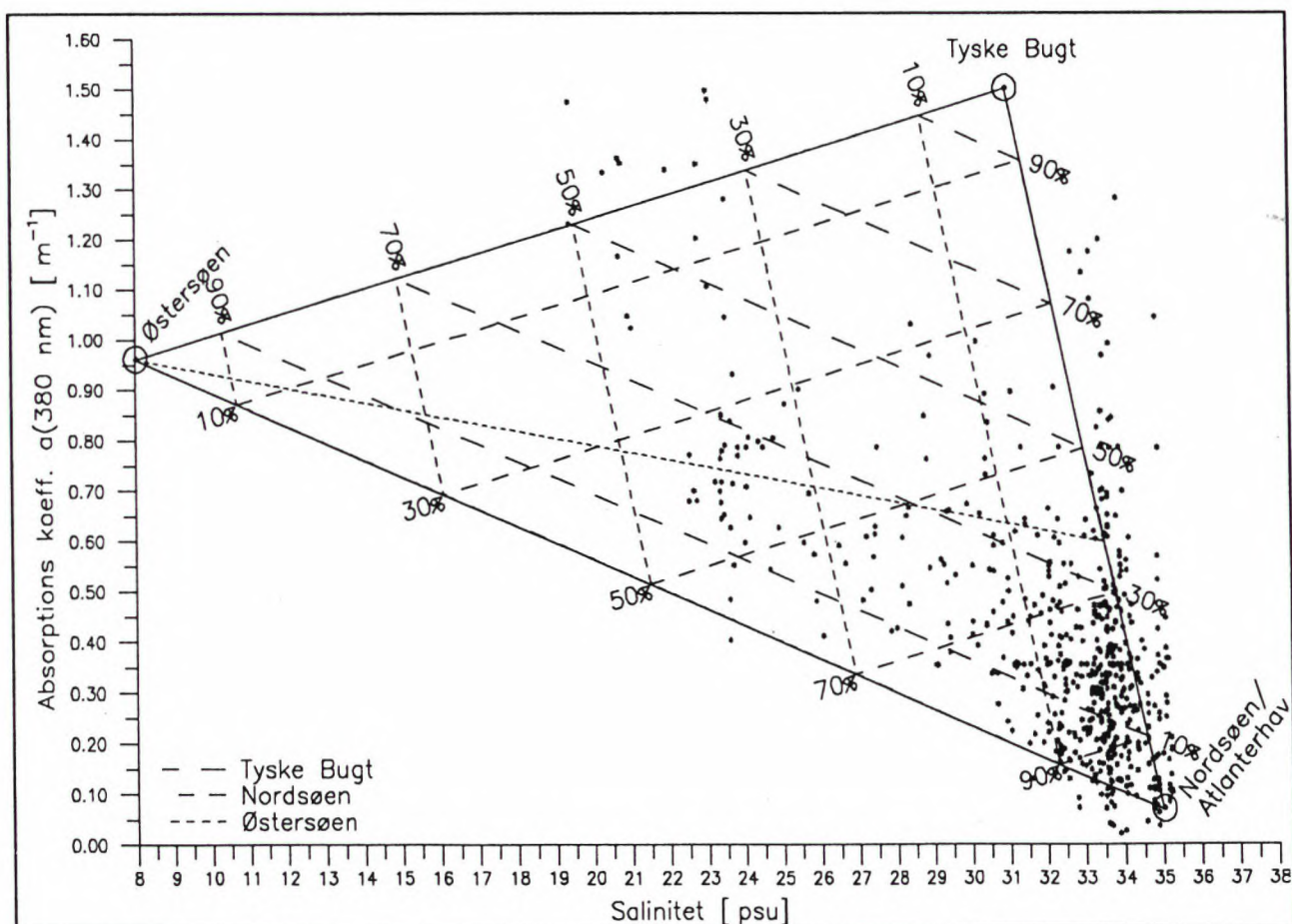
Har man f.eks. i Kattegat målt en salinitet på 28 promille og en gulstofmængde på $0,60 m^{-1}$, bliver formel (4) ved hjælp af værdierne i Figur 1 og 2:

$$\begin{aligned} q_0 + q_N + q_T &= 1, \\ 8q_0 + 35q_N + 31q_T &= 28, \\ 0,96q_0 + 0,07q_N + 1,50q_T &= 0,60. \end{aligned} \quad (5)$$

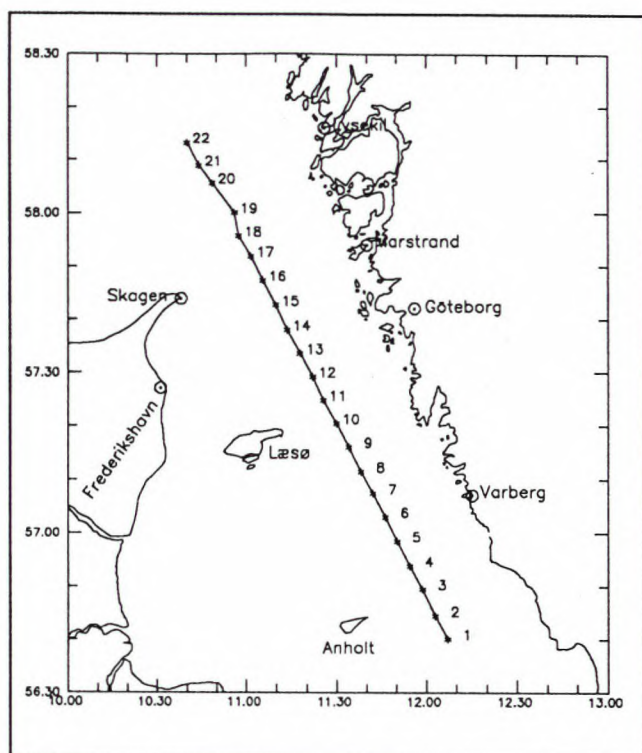
Disse 3 ligninger har løsningen:

$$\begin{aligned} q_0 &= 0,225(22,5\%), \\ q_T &= 0,230(23,0\%), \\ q_N &= 0,545(54,5\%). \end{aligned} \quad (6)$$

Man kan også ved hjælp af formel (4) beregne isolinier for q_0 , q_N og q_T , d.v.s. linier i S-gulstofdiagrammet hvor andelen af en given kernevandmasse



Figur 2. Salinitet-gulstofdiagram for marts 1992, Kattegat - Skagerak.



Figur 3. Kort over et snit i Kattegat/Skagerak

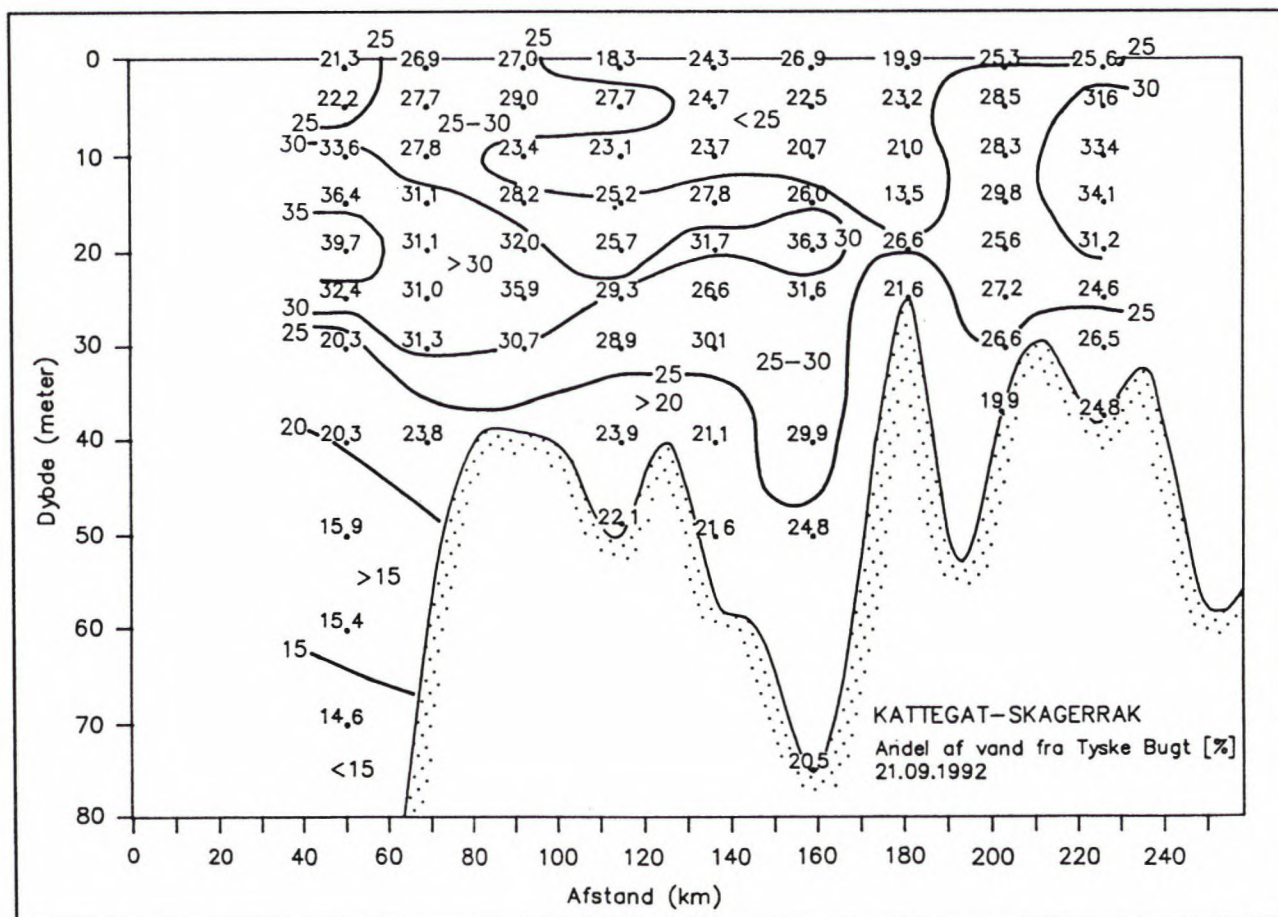
er konstant. I Figur 1 og 2 er isolinierne 10%, 30%, 50%, 70% og 90% optegnet for q_0 , q_N og q_T .

Ved hjælp af formel (4) er andelen af vand med oprindelse i Tyske Bugt beregnet for et snit fra den 21.09.1992 gående fra syd for Anholt til nord for Skagen, se Figur 3 og 4.

Det ses her, at den høje tyskebugtandel findes som et tungeformet mellemliggende lag omkring 20 meters dybde. Det ses også, at der har været en kraftig opblanding af dette vand, men at andelen ved bunden ligger på ca. 20-25 % for hele området. Det skal understreges, at $q_T(x,y,z)$ angiver pr. volumenenhed på en given lokalitet (x,y) i en given vanddybde z . Antag et vandlag i Kattegat med en tykkelse på dz omkring vanddybden z . Den samlede mængde tyskebugtvand bliver for dette vandlag:

$$V_T(z, z + dz) = q_T(x, y, z) dz dx dy \quad (7)$$

hvor integrationen i horisontalplanen foretages helt ud til Kattegats faste rande. Den samlede mængde vand fra



Figur 4. Andele af vand fra Tyske Bugt

Tyske Bugt i Kattegat bliver følgende:

$$V_T = \int_0^{z_{max}} V_T(z, z + dz) dz \quad (8)$$

hvor z_{max} er den maksimale vanddybde i Kattegat. Kattegats samlede rumfang kan herefter skrives som

$$V_K = \int_0^{z_{max}} dx dy dz \quad (9)$$

Den samlede andel af tyskebugtvand i hele Kattegat bliver dermed lig med $V_T/V_K \cdot 100\%$.

Det skal her anføres at selv om der endog kan forekomme store andele af tyskebugtvand, q_T , i Kattegats bundvand, så er det samlede mængdebidrag fra Tyske Bugt til Kattegat ikke betydeligt. Forklaringen herpå er den enkle, at bundvandets volumen kun udgør en brøkdel af den samlede kattegatvolumen, V_K , fordi havbunden falder jævnt fra kysten og udefter.

Indstrømning af jysk kyststrømsvand

For at beregne andelen af vand fra Tyske Bugt i Kattegats bundvand opstilles en simpel box-model, se Figur

5. Vi beskæftiger os i det følgende alene med volumenfluxene ind og ud af Kattegat.

Indstrømningen til Kattegats bundvand gennem den nordlige rand antages at komme fra Nordsøen/Atlantehavet (Q_N) og fra Tyske Bugt (Q_T). Udstrømningen fra Kattegats bundvand sker til Bælthavet og Øresund (Q_B), mens indstrømningen til Kattegats overfladevand sker fra Bælthavet og Øresund i forbindelse med, at udstrømningen derfra foregår til Skagerrak. Det bemærkes, at en kraftig vandblanding foregår henover skillefladen (også kaldet springlaget) i Kattegat, både opadrettet (Q_U) og nedadrettet (Q_D). Med krav om at gulstofkoncentrationen i Kattegats bundvand ikke må ændre sig i langtidsmiddel (taget over f.eks. en årelang periode) kan man opstille en helt sædvanlig bevarelsesligning for gulstofkoncentrationen (angivet som en absorptionskoefficient):

gulstofbidrag ind = gulstofbidrag ud

eller matematisk udtrykt:

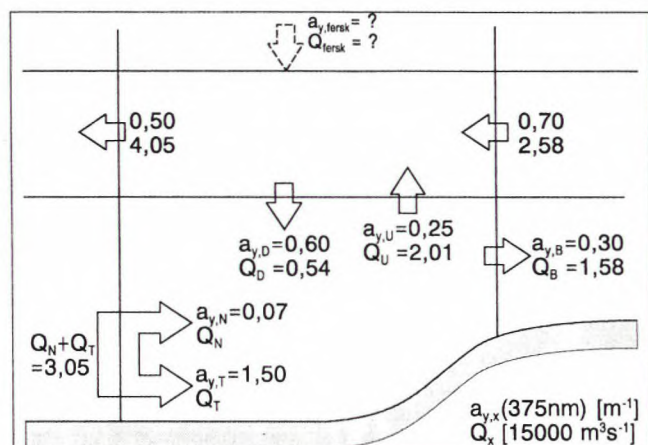
$$Q_N a_{y,N} + Q_T a_{y,T} + Q_D a_{y,D} = Q_U a_{y,U} + Q_B a_{y,B} \quad (10)$$

Med anvendelse af absorptionsværdierne og volumentransporterne fra Ref. 8 bliver resultatet:

$$(3,05 - Q_T) \cdot 0,07 + Q_T \cdot 1,5 + 0,54 \cdot 0,60 = 2,01 \cdot 0,25 + 1,58 \cdot 0,30 \quad (11)$$

og dermed

$$Q = 0,31[15.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}]. \quad (12)$$



Figur 5. Skitse for anvendt box-model, hvor $a_y [\text{m}^{-1}]$ er ved 375 nm. De nedre tal angiver vandtransporterne multipliceret med enheden $[15.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}]$, se Ref. 8. Desuden forekommer et mindre gulstofbidrag fra nedbør og afvanding til Kattegat.

D.v.s. at 90% af bundvandet i Kattegat kommer i middel fra Nordsøen og Atlanterhavet og dermed ikke fra Tyske Bugt. Dette fremgår af Figur 5, som viser at den samlede bundvandstransport fra nord og ind i Kattegat er lig med $Q_N + Q_T = 3,05 [15.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}]$, hvorved tyskebugtandelen bliver lig med $Q_T / (Q_N + Q_T) = 0,31/3,05 = 10\%$.

Med andre ord forurener Vesteuropæiske floder kun de indre danske farvande lidt.

Referencer:

- [1] Højerslev, N.K. (1989). "Vandbevægelser i kystnære områder (Systemet Østersøen-Nordsøen)". HCØ-tryk, 2. udg., side 1-234.
- [2] Højerslev, N.K. (1991): "Introduktion til Fysisk Oceanografi". HCØ-tryk, 3. udg., side 1-181.

- [3] Højerslev, N.K. (1988): "Natural occurrences and optical effects of gelbstoff". Rapport fra Geofysisk Afdeling, nr. 50, side 1-30.
- [4] Højerslev, N.K. (1971): "Tyndall and fluorescence measurements in Danish and Norwegian waters related to dynamical features". Rep. Inst. Phys. Oceanogr. Univ. Copenhagen, nr. 23, side 1-41.
- [5] Højerslev, N.K. (1982): "Yellow substance in the sea. I. The role of solar ultraviolet radiation in marine ecosystems", Ed. J. Calkins, Plenum Press, New York og London, side 263-281.
- [6] Højerslev, N.K. (1986): "Optical properties of sea water". Oceanography V/3, Ed. Af J. Sndermann, Landolt-Brnstein. Springer Int., New Ser, side 383-462.
- [7] Højerslev, N.K. (1989): "Surface water-quality studies in the interior marine environment of Denmark". Limn. Oceanogr., bind 34 nr. 8, side 1630-1639.
- [8] Hansen, I.S., Ærtebjerg, G., Jørgensen, L.A. og Pedersen, F.B. (1990): "Analyse af ilt-sænkning i Kattegat, Bælthavet og V. Østersø". Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 1, side 1-136.
- [9] Thorkild Aarup, Niels Holck og undertegnede har sammen skrevet i trilogi om alle disse ting i Continental Shelf Research, august 1996. Således kan den dybt interesserede læser fordybe sig yderligere i emnet på f.eks. forfatterens adresse.



Niels Kristian Højerslev er lektor ved Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Fysik, Astronomi og Geofysik.